

### 3. 平成 25 年度の成果の概要

#### 3-1. 地震・火山現象予測のための観測研究の推進

##### (1) 地震・火山現象のモニタリングシステムの高度化

地震現象と火山噴火現象の理解を深めるとともに、それらの予測精度の向上を目指し、日本列島全域に稠密（ちゅうみつ）な地震・地殻変動等の観測網、及び全国の主な火山に地震・地殻変動・重力等の火山活動観測網が整備されてきた。これらの観測網を着実に維持・更新し、得られたデータを活用した地震活動・地殻変動及び火山活動のモニタリングが進められた。さらに、諸観測網の高密度化及び多項目化といった整備・強化、新たな観測・解析手法の導入、観測データの準実時間での処理システムの開発と運用といったモニタリングシステムの高度化を図る研究が進められた。各種の観測によって得られた成果は、随時、地震調査委員会や地震予知連絡会・火山噴火予知連絡会等に提供され、会報にまとめられているほか、各機関等のウェブで公開した。

2011年3月の東北地方太平洋沖地震の発生以降、余震や誘発地震の活動により、震源決定処理量が膨大なものになっている。そこで、地震多発時の震源自動決定の精度を上げる研究開発を進め、気象庁一元化震源\*と比較して良好な結果を得ることができた。日本列島域において各種モニタリングシステムの安定な運用を継続することにより、2014年1月に、房総半島沖でのゆっくり滑りを検出した。地殻変動、傾斜変動、地震活動度の変化等がほぼ同時に観測され、房総半島沖における断層モデルが推定された（図6）。同じ場所ではほぼ同規模のゆっくり滑りが1996年以降に何回か観測されている。火山地域においても各種観測装置によるモニタリングが進められた。伊豆小笠原諸島の西之島では2013年11月から活発な火山活動が始まり、溶岩の流出が続いている。航空機による定期的な目視観測及び熱計測を実施して現状把握に努めた。

##### (2) 地震・火山現象に関する予測システムの構築

###### (2-1) 地震発生予測システム

地震発生予測システムの構築を目指して、地震発生とその準備過程の物理的理解に基づく地殻活動予測シミュレーションによる予測を実現するための研究及び地震活動の物理モデル・統計モデルに基づく地震活動予測手法の開発と高度化を行うための研究を実施した。

###### ・地殻活動予測シミュレーションとデータ同化

地殻活動予測シミュレーションを実現するため、予測シミュレーションモデルの改良・高度化とシミュレーションと観測システムを有機的に結合するデータ同化システムの開発を進めた。予測シミュレーションモデルの改良・高度化については、省メモリ化・高速化が可能な、大規模シミュレーションに適した計算手法を開発した。また、任意形状の地表面を持つ、半無限媒質に対する滑り応答関数の計算法を開発した。

南海トラフ域では、多様な発生様式を示す巨大地震や、短期及び長期的スロースリップを再現するモデルを構築し、前兆滑りの検出や津波地震の発生の可能性を検討した。東北地方太平洋沖地震の余効滑り\*発生領域では、データ同化実験のための三次元物理モデルの構築や断層摩擦特性推定手法の開発を行った。余効滑りに適合するプレート境界面の摩擦特性を計算したところ、摩擦特性の空間変化や滑り速度依存性を考慮する必要性が示唆された（図7）。また、三次元不均質構造やアセ

ノスフェア\*における粘弾性緩和\*の考慮の有無により、推定される余効滑りの分布が大きく異なることが分かった。さらに、プレート境界の繰り返し地震を活用した、プレート境界面における固着分布の推定手法の開発を進めた。東北地方太平洋沖地震の破壊開始点付近では、本震の10年ほど前からゆっくり滑りが時々生じ、滑り域の移動を繰り返しながら最終的な破壊に至る様子が推定された。

#### ・地殻活動予測シミュレーションの高度化

地震発生に影響する様々な要素を将来地震発生予測システムに組み込むための基礎的な研究を進めた。中部地方を対象に、活断層や不均質レオロジー構造を考慮した内陸地震発生サイクルモデルを構築し、長期の地殻変動をシミュレーションすることを可能にした。また、地震時の摩擦発熱による間隙流体圧上昇の効果を組み込んだ三次元準動的地震発生シミュレーションを日本海溝沿いから千島海溝南部までの広範囲で行い、大地震や巨大地震発生の特徴を再現した。

#### ・地震活動評価に基づく地震発生予測

地震活動予測手法の比較検証を目的とする CSEP と連携して、検証に用いる地震活動データベースなどの共通基盤を整備し、地震発生の統計モデル・物理モデルに基づく地震活動予測アルゴリズム\*の開発や、異なる予測手法間の比較実験を実施した。これまでの実験により、地震活動予測モデルが未成熟であることが浮き彫りとなったものの、モデルの優劣を客観的に検証する体制を構築するという目的はほぼ達成した。

## (2-2) 火山噴火予測システム

#### ・噴火シナリオの作成

富士火山について、過去の噴火の時期、場所、様式等を記した火山地質に関する報告書に基づき、山体崩壊、噴火場所、噴火様式についての分岐を考慮した噴火シナリオを試作した。富士火山は、ここ 300 年間は噴火していないものの、最近 2,000 年間の噴火頻度はインドネシアのメラピ火山と同程度で低くないこと、噴火発生場所は山頂部と山麓部でほぼ同じ頻度であること、プリニー式噴火は山頂部で発生した 1707 年の宝永噴火及び約 2800 年前の噴火（砂沢噴火）の 2 例が確認されているだけで、それ以外はほとんどストロンボリ式やハワイ式噴火であること、などが明らかとなった。

#### ・噴火シナリオに基づく噴火予測

平成 25 年 9 月に噴火を再開したインドネシアのスマトラ島北部のシナブン火山について、地質調査のみに基づいてこれまでに作成した噴火シナリオを用いて活動評価を行った。9 月に再開した噴火は、11 月には水蒸気爆発からブルカノ式噴火を含むマグマ水蒸気爆発に移行し、12 月下旬には山頂火口に溶岩が出現し、12 月末から溶岩崩落による火砕流が発生した。火砕流の規模とその流下範囲は 9~10 世紀の噴火とほぼ同じであった。これは、歴史的噴火事例のない状態で作成した噴火シナリオが想定していた噴火活動であり、地質調査に基づく噴火シナリオも活動評価に大いに有効であることが分かった（図 8）。つまり、過去の噴火観測事例がなくても、類似火山の噴火観測のデータを融合することによって、分岐判断に使用できる可能性があることを示す。さらに、噴火シナリオの実用化に関して、対象火山の過去の観測データだけでなく、国内外の類似火山の観測データを収集し参考にすることや、WOVO（国際火山観測所連合組織）のデータなどのデータアーカイ

ブを活用して分岐判断に供することの重要性を示している。

### (3) 地震・火山現象に関するデータベースの構築

地殻活動予測シミュレーションモデルの開発のためには、その基礎となるデータが必須である。地震現象や火山現象に関する予測のために必要な「基礎データベース」を構築するとともに、それらに関する情報の統合化を図り、地殻活動予測シミュレーションモデルの構築に資するための「統合データベース」の構築を目指して計画を推進した。

#### ・地震・火山現象の基礎データベース

東北地方太平洋沖地震の余震域及び地震活動が活発化した地域において、内陸域で M2.0 以上、海域で M3.0 以上の地震を精査し、追加検測・震源決定を行い、同時期の地震活動に関するカタログ化作業を完了した。全国ひずみ・傾斜データの流通と一元化の作業は順調に進められ、平成 25 年度末現在、合計 108 観測点、525 チャンネルのデータを試験流通させるに至っている。

#### ・地震・火山現象に関する情報の統合化

地殻応力場データベース、活断層データベース、活火山データベース、火山衛星画像データベースなどを統合して、地震や火山活動に関係する地質情報データベースとして統合する試みがなされた。また、将来噴火の可能性の高い活動的な火山を数火山選び、火山地質図の整備や、噴火シナリオの作成・高度化等の作業を行った。

## 3-2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

### (1) 日本列島及び周辺域の長期・広域の地震・火山現象

地震・火山現象に関する予測システムを構築するためには、プレートの沈み込みによって地震・火山噴火が生じる機構を解明し、長期的に見たときに日本列島はどのような場にあるのかを明らかにすることが重要である。具体的には、日本列島及びその周辺域で、長期的なプレート運動と応力場を明らかにし、上部マントルにおける水の供給・輸送過程とマグマの生成・上昇機構を解明して、これらと地震発生や火山噴火との関係を理解する必要がある。

#### ・列島及び周辺域のプレート運動、広域応力場

四国で発生した地震のメカニズム解から推定された応力場について検討したところ、四国前弧域\*では領域全体が回転した場合の応力場と整合的であり、微小地震から推定される応力場と活断層の滑りは統合的に理解できる可能性が示された。

#### ・上部マントルとマグマの発生場

プレートの沈み込みによって駆動される水循環について、レオロジーや溶融を組み込んだモデルの構築を進め、スラブ起源流体の発生と移動について理解が進んだ。モデル計算の結果と地殻熱流量分布・火山帯の位置との比較等により、蛇紋石\*のレオロジーや存在範囲の広がりについての情報が得られるようになった。

#### ・広域の地殻構造と地殻流体の分布

東北地方の下部地殻において、火山地域とその周辺で地震波の高減衰域の存在が推定され、その空間分布は第四紀火山の分布とほぼ一致することが分かった。このことから、高減衰域は火山の生成と大きく関与していると考えられる。地殻熱流量が低い地域でも地震波の減衰が大きい領域があることから、温度に関わらず地殻流体の分布と大きく関係していることが示唆される。

濃尾地震震源域で総合集中観測を行い、比抵抗の3次元地下構造を推定した。深さ4km程度までの地下浅部には濃尾地震断層南部に沿って低比抵抗帯が広がり、それ以深の地殻は全体的に高比抵抗であること、福井・岐阜県境域では上部マントルに東西方向に低比抵抗で地震波低速度領域が存在することが示された。この低比抵抗域は、深さ100km以深にまで達していて、その成因は太平洋プレートの脱水が関与している可能性がある(図9)。

#### ・地震活動と火山活動の相互作用

伊豆大島のマグマの蓄積による地殻変動と地震活動度の時間推移の関係を調べた。地殻変動データからマグマ蓄積量の時間変化を推定して震源域における応力変化を求め、この応力変化と摩擦構成則に基づく地震活動度を表すモデルを用い、モデルから予測される地震活動度と観測された地震活動度を比較した。その結果、流体圧の変動を考慮すれば、全期間を通して地震活動度はこのモデルで説明できることが明らかになった。この結果は、今後起こる火山噴火の規模や噴火様式\*の予測にも役に立つと期待される。

#### ・地震発生サイクルと長期地殻ひずみ

高解像度DEM(Digital Elevation Model; 数値標高モデル)データにより、現地測量と同程度の分解能の地形データが得られることを検証した。これまで植生や建造物のために空中写真では判別が難しかった活断層も、高解像度DEMデータを用いれば判別が容易になる場合があり、活断層の再発見につながると期待される。

## (2) 地震・火山噴火に至る準備過程

### (2-1) 地震準備過程

地震発生の準備過程を解明するために、地殻とマントルで応力が特定の領域に集中し地震発生に至る過程を明らかにする。プレート境界地震に関しては、プレート境界の固着状態の把握やプレート境界におけるゆっくり滑りの時空間的推移、プレート境界近傍の地震発生場における応力状態等を解明する。内陸地震に関しては、広域の応力によって非弾性\*的な変形が進行して、特定の震源断層に応力が集中する過程をモデル化することが必要であり、新潟-神戸ひずみ集中帯や近年発生した内陸大地震発生域等における詳細な媒質構造不均質性及び応力場、ひずみ速度場等を明らかにする。また、スラブ内地震については、海洋プレート内の震源分布や地震波速度構造、応力場を詳細に調べて、スラブ内の強度分布及び流体の分布・挙動と地震発生に至る過程を解明する。

#### ・アスペリティの実体及び非地震性滑りの時空間変化とアスペリティの相互作用

日本海溝陸側の海溝軸ごく近傍で過去に実施された地震探査の結果を東北地方太平洋沖地震の地震時滑り分布と比較した結果、プレート境界上盤側に位置するくさび状の低速度域(地震波)の幅が狭い領域と、大滑り域の南北方向の広がりとが良い一致を示すことが分かった。

東北地方太平洋沖地震の大滑り域において、地球深部探査船「ちきゅう」による掘削調査が実施され、震源断層周辺での残留摩擦熱が計測された。本震の滑りが発生した断層領域の厚さは非常に薄く（5m以下）、主に弱い岩石（粘土）から構成されていた。断層運動時の摩擦熱により膨張した水の影響で、摩擦強度がより小さくなる状況が発生し、そのために海溝軸付近で水平に50mもの滑りが発生したものと推定された。

日向灘沖において、海底地震観測により浅部低周波微動\*が捉えられ、浅部で短期的なゆっくり滑りが発生していることが推定された。浅部低周波微動の発生域の移動も観測され、小繰り返し地震発生領域の浅い側の限界付近まで移動したことが分かった。

日向灘～南西諸島北部域では、約21年間にわたる小繰り返し地震活動の空間分布及び時間変化の特徴が示された（図10）。この領域に発生する小繰り返し地震の活動様式は、比較的定常的に繰り返し活動するタイプ（R）、クラスター\*的に活動するタイプ、いずれにも判別できないものに分類されるが、1923年以降に発生したM7.0以上の地震は、Rタイプが見られない領域でのみ発生していることが分かった。豊後水道のゆっくり滑りの発生領域Aでは、小繰り返し地震はほとんど発生していない。解析領域の南部では非地震性滑りの滑り速度はやや遅く、空間的な変化は比較的小さい。これに対して、解析領域の北部では滑り速度がやや速く、空間的な変化は相対的に大きい。この違いは、領域によってアスペリティ間相互作用の程度が異なることによるものと解釈できる。

東北地方太平洋沖地震の震源域直上に設置された海底圧力計及び陸上沿岸部の体積ひずみ\*計により、2011年1月下旬～3月9日の最大前震直前までゆっくり滑りが継続していたことが推定されているが、さらに、海底地震計記録によりこのゆっくり滑りに伴う微動発生が確認された。微動は4-8 Hzにピークを持ち、西南日本等で観測されている深部低周波微動の特徴とほぼ一致する。2011年1月末頃から観測され始めた微動の振幅は、3月6日頃から増大し、3月9日の最大前震発生直前で最大となった。観測された波形から微動のおおよその発生位置を推定した結果、海溝軸付近から陸側30km程度の範囲に分布する可能性が高いことが分かった。これらの微動発生域は、本震時の大滑り域と概ね一致する。

#### ・ひずみ集中帯の成因と内陸地震発生の準備過程

日本海東縁ひずみ集中帯に位置する2004年中越地震及び2007年中越沖地震の震源域周辺において、これらの地震の発生前後の地殻変動のモデル化が行われた。この地域では、弾性的な上部地殻及びそれを覆う厚い堆積層の大部分を切る断層が定常的に滑ることにより短縮変形が生じ、観測されたひずみの大部分は非弾性的なものであったと考えられること、中越地震や中越沖地震後の顕著な地殻変動パターンの変化は本震で破壊された断層が地震後も滑ることで短縮変形を生じたことと解釈されることが示された。

新潟-神戸ひずみ集中帯の南西端に位置し、花折断層・有馬高槻断層系等活断層が集中している近畿地方中北部において、ひずみ集中機構及び断層への応力集中機構の解明のための物理モデルを構築した。この地域の主要な活断層を対象に、下部地殻の変形は断層帯に局所化していること、上部地殻の断層は高角で下部地殻への直線的な延長部を持つこと、新潟-神戸ひずみ集中帯においては断層帯が水平方向に連続していることなどを仮定した。計算された長期的な変形は、琵琶湖、大阪湾や奈良盆地での沈降、及びその周辺での隆起を示し、また琵琶湖から大阪湾にかけてひずみが集中すること等、地形や観測データの特徴を再現した。

日奈久断層南西部（八代海）の活発な微小地震活動域においては、地震発生層の下限より数km深

い位置に、遠地巨大地震によって励起された低周波微動活動が見出された。この低周波微動活動は断層深部延長における流体やゆっくり滑りの存在を示唆している。

#### ・スラブ内地震の発生機構

1933年の三陸沖地震の余震について、三次元地震波速度構造を用いた震源再決定が行われ、ほとんどの余震の震源はおおよそ50kmより浅く、海溝の陸側と海側の両方に分かれて分布することが示された。これらの余震について、水沢観測点における波形記録の卓越周波数を調べた結果、海溝を挟んで陸側では低周波、海側では高周波成分が卓越する特徴を持つことが分かった。この特徴は、これら二つの領域における現在の地震活動にも見られることから、上述の海溝両側に及ぶ余震の発生と調和的である。また、再決定された震源分布は海溝軸をはさんで、東側は西傾斜、西側は東傾斜のV字形分布を示すことから、二つの断層面が複合破壊した可能性もある。

東北地方のスラブ内地震に見られる太平洋プレート上部境界でのPS変換波\*の走時を用いて、海洋性地殻のP波速度構造が推定された。その結果、P波速度は前弧側で6.5-7.5 km/s、背弧側で7.5-8.5 km/s であり、火山フロント下を境に速度が大きく変化することが明らかになった。また、深さ60-100kmにおける海洋性地殻の速度は、含水化したスラブ構成岩から期待される速度よりも遅く、含水鉱物に加えて自由水の存在が示唆される。さらに、上面地震帯の活動は地震波速度が特に低速度となる深さ範囲で活発であり、これらは、スラブ内地震の発生に高間隙圧水が重要な役割を果たしているというモデルを支持する。

## (2-2) 火山噴火準備過程

噴火準備過程では、時間スケールによって注目すべき現象が多岐にわたる。これらをできるだけ包括的に理解するため、地球物理観測と噴出物分析による現在進行中のマグマ上昇・蓄積過程の解明と、地質学や岩石学的手法に基づく過去の噴火準備過程（すなわち噴火履歴）とマグマ系発達過程の解明を2本の柱として研究を推進してきた。

#### ・マグマ上昇・蓄積過程

2009年から本格的なマグマ噴火に移行した桜島においては、各種地球物理観測と物質分析を継続的に行った。2009年以降、山体は間欠的な膨張と収縮を繰り返すようになったが、長期的な傾向としては火道の拡大に伴って噴火が激化したことでマグマの噴出量が増加し、島内の地殻変動は膨張がやや鈍化もしくは収縮傾向となっていることが分かった。これらの事実は各種地球物理観測や火山ガス観測・物質分析とも調和的であった。各種モニタリングに基づいて推定されたマグマ上昇・蓄積過程を、地下構造探査の反復によって速度構造等の時間変化として捉える試みも行い、有意な変化を検出した。

伊豆大島に設置されている体積ひずみ計のデータを1980年代まで遡り再解析したところ、火山性収縮・膨張変動と火山性地震活動の対応が1986年噴火の前にも起こっており、変動の大きさは最近の約2倍であったことが示された。マグマ蓄積場所が1986年の噴火前と現在が同じかどうかなど検討課題は残るものの、これらは、火山噴火の準備過程の理解や次の噴火の発生予測のための重要な知見である。

一般に地殻変動が小さいとされる水蒸気噴火の準備過程では、噴火発生場の火山ガス・電気比抵抗・熱によるモニタリングの手法開発と実践を行った。草津白根山では、フッ素/塩素比の変化が火口下の熱水系\*に供給される高温の火山ガスの監視指標になる可能性を示した。また、土壤拡散放

出ガスの放出量をモニターする方法や火口湖直下の比抵抗変化の検出に特化した人工電磁法装置を開発した。阿蘇山と草津白根山で、火口湖の熱収支・水収支・放熱率のモニタリングを行った。このうち阿蘇山では、2014年の微噴火時の各種観測の間に関係が見られることを示した。

#### ・噴火履歴とマグマ系発達過程

伊豆大島では、1777-78年、1950-51年、1986年の噴出物試料について、高精度の微量元素濃度測定を実施した。全岩組成トレンドとの対比により、1986年噴火時には2種のマグマ混合が起こっていた可能性が示された。蔵王山では、噴火履歴調査で得られた5つの噴火イベントを解析したところ、いずれも浅部マグマ溜まり\*に深部からの高温マグマが注入することで引き起こされた可能性が高いことが明らかになった。また、噴火履歴調査結果に基づいて、今後想定される噴火の推移を検討した。

噴火履歴の高精度化を目的として史料の解読による噴火推移の再現にも取り組んできた。これまでに、伊豆大島1777年安永噴火、桜島1779年安永噴火、浅間山1783年天明噴火、青ヶ島火山、有珠山について解読を行ってきたが、25年度は北海道駒ヶ岳について実施し、今後、噴火シナリオ作成の基礎データとして活用されることになる。

### (3) 地震発生先行・破壊過程と火山噴火過程

#### (3-1) 地震発生先行過程

地震発生の予測の時間精度を高め、短期予測を可能にするためには、地震発生の直前に発生する非可逆的な物理・化学過程(直前過程)を理解して、予測シミュレーションモデルにそれらの知見を反映させ、直前過程に伴う現象を的確に捕捉して活動の推移を予測する必要がある。これまでの研究によって、地震に先行して発生する現象は多種多様であり、地震発生準備過程から直前過程にまたがって発生する現象の理解を進める必要性が認識されてきた。このために、地震に先行する地殻等における諸過程を地震発生先行過程と位置付けて研究し、そのメカニズムを明らかにして、特定の先行過程が地震準備過程や直前過程のどの段階にあるのか評価することが重要である。

#### ・観測データによる先行現象の評価

2011年東北地方太平洋沖地震後マグニチュードが大きくなった岩手県釜石沖の繰り返し地震について調べると、その滑り域が巨大地震発生前に比べ広がっていることが分かった(図11)。この結果は、これまでの繰り返し地震の滑り域の周囲に条件付き安定滑り領域が存在していることを示唆している。このような、応力変化速度に依存する滑り特性の変化は、今後地震の時期の予測だけでなく規模の予測にとって重要である。

微小破壊観測を実施している南アフリカ金鉱山において、採掘前線の前方20mの地点で、平面上に分布する微小破壊のクラスター(図12)が現れ、初期には5m程度の広がりしかなかった活動域が、その後3か月の間に差し渡し20mまで拡大した。これは、岩石実験等で知られている、応力上昇による微小破壊の活動変化がフィールドスケールで確認された例と見ることができる。ただし、活動域が約20mまで拡大したところで採掘を停止したため、より規模の大きい地震は発生しなかった。

#### ・先行現象の発生機構の解明

地電位観測を行っている神津島では、地震に先行する信号は、主に南北成分について観測されたものが多かったが、有限要素法によるシミュレーションによって、電流ソースの方向にかかわらず、地表付近にある金属製人工物の影響で説明できることが分かった。同島で実際に人工電流注入実験を行った際にも同様の傾向が見られた。

### (3-2) 地震破壊過程と強震動

大地震発生に伴い生じる強震動や津波を高精度に予測し災害軽減に資するためには、地震断層面の不均質性と破壊の特性を理解し、地下構造モデルを高度化する必要がある。こうした目的に向け、2011年東北地方太平洋沖地震や近年の大地震の動的震源破壊特性の解析、地震前後の地震活動の推移、そして強震動及び長周期地震動の生成に関する研究を進めた。また、近年整備された、全国強震観測網\*を活用した大地震の震源過程\*の即時・自動解析システムの開発や、強震動分布に基づく地震規模と震源域の広がり の推定手法の開発、沖合ケーブル津波計データを用いた津波予測手法に関する研究が進められた。

#### ・断層面の不均質性と動的破壊特性

2011年東北地方太平洋沖地震の震源解析では、近地強震動、遠地実体波、地殻変動、津波データといった、多様な観測データとその統合解析が行われた。東北地方太平洋沖地震の広い震源域のうち、強震動被害に関わる短周期～やや長周期（周期0.1～10秒）の地震波の生成域は、巨大な津波の発生原因となった浅部のプレート境界の超巨大な滑り域とは一致せず、プレート境界の比較的深い（深さ25-50km）場所に限定され、その領域はこれまでに東北沖で繰り返し発生したM7～8クラスの地震のアスペリティに一致することが示された(図13)。

#### ・強震動・津波の生成過程

津波の即時解析に向けた研究では、沖合津波計データを利用した解析の有効性が示された。また、津波警報の解除のタイミングを判断するために、津波の後続波の振幅の減衰特性を評価した。これにより、津波警報の解除時刻を精度良く予測できる可能性が示された。

### (3-3) 火山噴火過程

噴火規模や様式、噴火推移を支配する要因を理解するためには、火道浅部におけるマグマの挙動や火山体構造の状態を把握し、それらと噴火規模や様式との関係を明らかにすることが必要である。「噴火機構の解明とモデル化」と「噴火の推移と多様性の把握」の研究をあわせて考察することにより噴火シナリオの作成に資することを目的として研究を進めてきた。

#### ・噴火機構の解明とモデル化

火山噴火機構を調べるために、インドネシアのロコン山の臨時地震観測点等の波形データ解析を進めた結果、爆発地震の初動から約1秒間は、火口底からの火山物質の噴出に先行し、火道の収縮現象が起きていることが明らかとなった。この特徴は、前年度に実施した諏訪之瀬島の爆発地震の解析結果や桜島での既往研究により明らかにされた特徴と類似しており、ブルカノ式噴火発生直前の火道プロセスに共通性があることを示すことが分かった。また、爆発地震を引き起こす火道内の圧力解放過程には、火道等の大きさが規模を支配している可能性が示された。



#### ・噴火の推移と多様性の把握

水蒸気爆発の発生や熱水系に関係する浅部水環境を理解するために、有珠 2000 年噴火時に形成された新山域を対象にした試錐（ボーリング）及び構造探査データをもとに、浅部構造の検討を進めた。その結果、深さ 500m までに 2000 年噴火時の貫入マグマは確認されず、深さ 90m 前後で 65 度を示す孔底温度や地温勾配は、有珠山周辺の温泉井と変わらないことが分かった。これらのことから、浅部にマグマ貫入\*した可能性は低いと考えられる。

日本列島やインドネシア、チリなどの地域の火山の VEI を調べた結果、全地球の火山に対する VEI の頻度分布と同じく、べき乗則が成り立っていることが明らかとなった(図 14)。VEI6 の低頻度大規模噴火までこの規則性が保持されていることから、規模の大きな噴火に、小さな噴火と異なる特別の過程があるわけではないことが示唆された。

#### (4) 地震発生・火山噴火素過程

より信頼性の高い地震発生モデルを構築するために必要な、地震発生の各過程を支配する破壊・摩擦構成則の素過程を理解するための実験的・理論的研究を行った。時空間的スケールが数桁以上異なる自然地震へ室内実験の知見を適用することの妥当性を検討するために、摩擦・破壊現象の規模依存性\*を明らかにするための実験・観測を行った。また、火山噴火のモデル化のために火山噴火素過程の研究を行い、火山性長周期地震の発生機構に関しての理論的研究などで進展がみられた。

#### ・多体粒子系の摩擦

低い法線応力下での粉体層の摩擦に関して、実験を通して低速、中速、高速滑りについて、それぞれの速度領域で支配的な物理過程のモデル及びその移り変りの理論を提案した。低速度域での摩擦の振る舞いは、速度・状態依存摩擦則で良く説明できる。中速域においては、摩擦の顕著な速度弱化\*が観察され、真実接触部の局所的な温度上昇で定量的に説明できる。地震時の断層滑り速度程度の高速域では、摩擦の顕著な速度強化が見出され、摩擦物の動的再配置に伴う散逸過程として定量的に解釈できることが分かった。

#### ・釜石沖繰り返し地震のシミュレーション

釜石沖で比較的規則的に発生していた繰り返し地震は、2011 東北地方太平洋沖地震後にこれまでよりも規模が大きい地震が発生するなど発生パターンが大きく変わった。東北地震の余効滑りの観測結果に基づいてモデル領域に対する载荷速度を変えて地震発生サイクルシミュレーションを行ったところ、観測事実の特徴を再現するような地震発生パターンを得ることができた。

#### ・南アフリカ金鉱山での地震観測

地震発生過程における微小破壊の役割を調べるため、南アフリカ金鉱山において、AE\*観測を行っている。既存断層において繰り返し地震が見つかったが、これら地震の応力降下量は、一般的な地震と同程度であった。

#### ・固液二相系における振動現象のモデリング

阿蘇山・吾妻山・蔵王山・八甲田山等の活火山における長周期地震・単色地震\*の波形解析及び振動特性の整理・検討を行い、長周期地震や単色地震を発生させる震源における力の卓越成分は開口亀裂型の体積変化成分で特徴付けられることを明らかにした。固液二相系の数値モデリングの比較

から、これらの長周期地震が、火口直下の亀裂面・亀裂群における熱水反応によって生じていると推察された。

### 3-3. 新たな観測技術の開発

これまでの地震・火山噴火研究の進歩や防災対応の高度化には、新たな観測技術の寄与が大きい。本計画では、このような観点から、新たな観測技術の開発に注力している。

#### (1) 海底における観測技術の開発と高度化

海底地殻変動観測技術では、海底広帯域地震計\*を利用した海底傾斜変動観測の実用可能性の検討と、GPS-音響測距結合方式による海底地殻変動観測での誤差要因となる海中音速の構造推定の高度化が行われ、それぞれに進展が見られた。また、これまで設置の限界であった水深 6,000m を超える場所での海底地震観測を目指した開発が進められ、その実用化試験も試みられ、実用化に近いところまで開発が進んだ。さらに、海底ケーブルによる各種海底観測の開発では、設置後に多項目の観測機器を増設できるなどの拡張性は高いが設置コストが高い海底ケーブル式の地震・津波観測監視システム (DONET2) と、拡張性はそれよりも劣るが設置コストが安いケーブル式海底地震津波観測網 (S-net) の開発が進められ、それぞれの特徴を生かした性能強化が進められた。

#### (2) 宇宙技術等の利用の高度化

東北地方太平洋沖地震のような超巨大地震の規模推定には、GNSS 衛星からの信号をリアルタイムで解析して地上の変位を自動的に計算し、地震の規模を推定するシステムが有効である。このようなシステムの開発と改良を行い、実用化に向けた取り組みが行われた。また、衛星搭載合成開口レーダーを用いた広域な地殻変動観測手法の開発では、永続散乱体干渉法と呼ばれる手法を改良し、年間約 5~10mm 程度の極めて緩やかな地殻変動を検出することが可能になってきた。この手法は、火山の噴火前後の地殻変動の解析にも利用されている。特に、2011 年 1 月下旬に噴火した霧島山新燃岳では、爆発的噴火後に火口に溶岩ドームが生成され、成長してゆく様子が衛星画像を用いて詳細に捉えられた。

#### (3) 観測技術の継続的高度化

宇宙線ミュオンを利用した地下状態の可視化技術については、ノイズを低減して検出感度を高める改良を進め、新たな検出器が完成した。この結果、地下構造の可視化に必要な時間が 1 か月程度から数日程度に短縮できた。この装置を用いて現在噴火活動が活発な薩摩硫黄島で観測したところ、火口直下のマグマの状態と噴煙の状況に良い相関があることが示された。今後は、このような事例を増やし、噴火活動の予測にどのように活用できるかを検証することが重要である (図 15)。

絶対重力計の小型化、高温の測定環境である大深度ボアホールで利用できるレーザー干渉式広帯域地震計の開発、機動的な地殻変動観測装置、無人ヘリコプターによる火口近傍での各種観測に関する開発も進められた。

### 3-4. 超巨大地震に関する当面実施すべき観測研究の推進

平成23年に発生した東北地方太平洋沖地震のようなM9クラスの超巨大地震の発生予測の観測研

究を推進するために、平成24年度から新たに超巨大地震の発生機構とそれに起因する現象を解明する観測研究、及び超巨大地震やそれに起因する現象を予測するための観測研究、さらにはこれらの解明と予測のための観測研究に必要な新技術の開発を行う研究が実施された。

### (1) 超巨大地震とそれに起因する現象の解明のための観測研究

古津波堆積物の掘削調査を北海道の根室海峡沿岸で実施し、古津波堆積物の可能性の高い砂層を2層発見した。下北半島では17世紀の巨大津波の痕跡を新たに発見した。日本海溝沿いでは、東北地方太平洋沖地震後の津波堆積物調査結果に基づいて断層モデルの改良を行い、869年貞観地震とよく似た地震であったことがより明確になった。南海トラフ沿いでは、津波堆積物と地殻変動の検出を目的とした掘削調査を継続した結果、いずれの地域とも地形や地質に残る規模の地震が数百年以上の間隔であることが明らかになった。

海域の海底地震計観測も含めて東北地方太平洋沖地震後の余震活動について調査した。本震前後の地震の発震機構\*を調べたところ、本震前には逆断層型のプレート境界地震が多いが、本震後は正断層\*型地震が多く分布している。本震前後のプレート境界地震の発生レートから、本震時の滑り領域はプレート境界地震の減少域とよく一致し余震活動が低調であること、その周囲は地震の増加域にあたり余効滑りの到達域を示すことが分かった。この増加域の北側は1994年三陸はるか沖地震の滑り域の中心に及んでいない。地震の滑り域とそれ以外の場所での摩擦特性の違いが示唆される。震源域南部（福島県沖から千葉県房総半島沖）では余震が少なく、本震時の破壊が太平洋プレートにフィリピン海プレートが接触しているこの付近で停止したと推定された（図16）。

東北地方太平洋沖地震発生前から宮城県沖で行っていた自己浮上式海底圧力計（OBP）の設置による繰り返し観測から、東北地方太平洋沖地震の震源域内で2008年と2011年にゆっくり滑りが発生していたことを見いだした。2011年のイベントは本震発生の約1か月前から直前まで継続していた可能性が高い。2008年に発生した茨城県沖のプレート境界型地震M7.0の発生前に本震の近傍で発生した群発的な地震活動について解析し、本震発生の数日前からの地震活動度の増加、本震の破壊開始点への前震発生域の拡大が見られた。この期間に発生した中規模地震の発震機構解は低角逆断層型であり、前震が小繰り返し地震を含むことから、本震発生前に破壊開始点の近傍でゆっくり滑りが進行していたと解釈でき、2011年東北地方太平洋沖地震の前震活動の特徴と類似していることが明らかになった。

海陸の地殻変動観測データに基づき、東北地方太平洋沖地震の余効滑り分布を推定した。地震時には大きな滑りが生じなかった茨城・福島両県沖のプレート境界の浅部に大きな余効滑りが推定された。宮城県沖におけるOBPの連続記録からは余効変動\*による海底鉛直変動の時系列が得られた。いずれの観測点においても明瞭な沈降が観測され、その変動レートは時間とともに減少した。OBPとGPS-音響測距結合方式の観測結果を総合すると、宮城県沖では余効変動による沈降は海溝軸から海岸線に向かって、また観測領域南側ほど大きくなる傾向が見られた。

東北地方太平洋沖地震発生後、東北地方内陸域、茨城県北部・福島県南東部、長野県北部等で活発な地震活動が発生した。これらの誘発地震のメカニズム解の解析結果は、クーロン破壊関数の静的変化( $\Delta CFF$ )\*でおおむね説明可能であるが、震源の移動や震源域の広がりや時間発展が見られることから、誘発地震の発生には間隙流体圧の時間変化による断層強度の低下が重要な役割を果たしている可能性がある。

### (2) 超巨大地震とそれに起因する現象の予測のための観測研究

プレート境界の固着状況を把握するために、GPS-音響測距結合方式による海底地殻変動観測を継続した。日本海溝沿いの海底基準点では、東北地方太平洋沖地震発生後の余効変動による西向きの変動を含む複雑な海底変動を捉えた。また、南海トラフでは、トラフ軸から陸域までの連続的な地殻変動プロファイルを得るために、尾鷲沖にトラフを挟んで陸側約 15km の地点と海側約 35km の地点に深海型と呼ばれる海底局を設置し観測を継続した。

津波遡上数値計算のデータベースを利用して、リアルタイムで津波浸水域を予測する手法を開発した。その手法を東北地方太平洋沖地震に適用して手法の有効性を評価し、地震発生後10分間程度で予測が可能であることが示され、実装可能なリアルタイム津波浸水予測手法の有効性が検証された。

### **(3) 超巨大地震とそれに起因する現象の解明と予測のための新技術の開発**

海底間音響測距装置に対して、ガラス球の 9,000m 耐圧化、信号の感度向上、データ収録方法の改良を行い、日本海溝を跨いだ 3 か所に設置して半年の連続観測に成功した。

潮岬周辺において、津波石\*の分布を正確に把握するために地上レーザー計測を実施し、それを基に津波の浸水計算による震源モデルの検討を行った。